

Nghiên cứu đánh giá các phương pháp thử nghiệm tăng tốc cacbonat trong kết cấu bê tông cốt thép

Research and evaluation of CO₂ penetration testing methods in concrete structures

> THS LÊ QUỲNH ANGA

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: ngaketcau@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Các kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) trong môi trường hiện nay do sự biến đổi khí hậu nên việc thâm nhập CO₂ theo thời gian sẽ làm cho kết cấu bị suy thoái dẫn đến ăn mòn do cacbonat hóa gây ra. Để đánh giá tình trạng của các kết cấu này, trên thế giới có rất nhiều phương pháp thử nghiệm, các phương pháp thử nghiệm tại hiện trường và trong phòng. Bài báo trình bày đánh giá các phương pháp thử nghiệm thâm nhập của CO₂ vào kết cấu BTCT.

Từ khóa: Bê tông cốt thép; thử nghiệm; CO₂; cacbonat; ăn mòn.

ABSTRACT

Reinforced concrete (RC) structures exposed to contemporary environmental conditions are increasingly vulnerable to degradation driven by climate change, specifically through the time-dependent ingress of carbon dioxide (CO₂), which ultimately leads to carbonation-induced corrosion. To assess the condition of such structures, numerous testing protocols have been established worldwide, comprising both in-situ and laboratory-based methods. This paper presents an evaluation of the testing methods utilized to determine the extent of CO₂ penetration in reinforced concrete structures.

Keywords: Reinforced concrete; test methods; CO₂; carbonat; corrosion.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và gia tăng khí thải nhà kính toàn cầu dẫn đến CO₂ thâm nhập vào trong kết cấu bê tông dẫn tới quá trình cacbonat hóa. Quá trình cacbonat hóa bê tông không diễn ra ngay một lúc mà nó âm thầm gây ăn mòn và phá hủy kết cấu bê tông. Sự phức tạp của quá trình cacbonat hóa tự nhiên vốn phụ thuộc vào các biến số ngẫu nhiên như độ ẩm môi trường, nồng độ CO₂ môi trường, nhiệt độ môi trường. Tốc độ cacbonat hóa rất chậm, thường vài milimet sau cả thập kỷ nên các phương pháp thử nghiệm tăng tốc (Accelerated Carbonation Testing - ACT) được phát triển trên toàn cầu. Mục tiêu của bài báo này là phân tích các tiêu chuẩn tăng tốc hiện hành từ các tổ chức uy tín trên thế giới và so sánh với tiêu chuẩn Việt Nam. Trên thế giới có rất nhiều phương pháp thử nghiệm tăng tốc cacbonat hóa khác nhau như TCVN 13929-2024 [1], tiêu chuẩn của châu Âu BS EN 12390-12 2020 [3], tiêu chuẩn Nhật Bản JIS A 1153:2012 [4], tiêu chuẩn Pháp XP P18-458 [6], tiêu chuẩn Trung Quốc GB/T 50082-2009 [8]. Vấn đề đặt ra là cần tìm hiểu so sánh và đánh giá các phương pháp tăng tốc khác nhau trên thế giới. Mỗi phương pháp có một số ưu, nhược điểm nhất định, ta cần so sánh đánh giá phạm vi ứng dụng của từng phương pháp.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Độ bền lâu dài của bê tông cốt thép phụ thuộc vào khả năng bảo vệ cốt thép khỏi ăn mòn, khi bê tông chưa bị cacbonat hóa

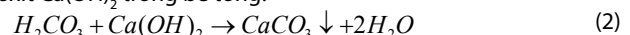
môi trường kiềm cao (PH từ 12,5 đến 13,5). Môi trường tính kiềm hóa cao này chủ yếu do sự hiện diện của Canxi Hydroxit Ca(OH)₂ và các hydroxide kiềm (Natri và kali). Tính kiềm cực cao này đẩy sự hình thành một lớp màng bảo vệ thụ động mỏng manh chỉ dày vài nanomet trên bề mặt cốt thép.

Quá trình cacbonat hóa là một chuỗi các phản ứng liên kết đòi hỏi CO₂ phải khuếch tán qua cấu trúc lỗ rỗng, hòa tan trong nước, sau đó phản ứng với các pha hydrat hóa chứa canxi. Phản ứng hóa học chính là:



Hòa tan CO₂ từ không khí vào nước trong các lỗ rỗng của bê tông thành axit cacbonic (H₂CO₃).

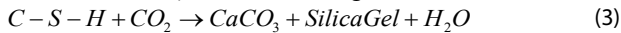
Phản ứng trung hòa kiềm axit cacbonic phản ứng với canxi hydroxit Ca(OH)₂ trong bê tông:



Sản phẩm canxi cacbonat CaCO₃ làm giảm độ xốp và có thể làm tăng cường độ của bê tông ở bề mặt. Quá trình này làm giảm OH⁻ dẫn đến sự giảm độ PH.

Sau khi lượng Ca(OH)₂ trong hồ xi măng bị tiêu thụ hết, CO₂ dư thừa sẽ tiếp tục tấn công pha keo xi măng chính Canxi silicat Hydrat C = CaO, S = SiO₂, H = H₂O (C-S-H). C-S-H là nguồn dự trữ canxi và silica quan trọng và phản ứng cacbonat hóa C-S-H là cơ chế quyết định sự suy giảm tính kiềm lâu dài và phá hủy cấu trúc của bê tông. Sự cacbonat hóa C-S-H dẫn đến sự hình thành thêm CaCO₃ và giải

phóng gel Silica hydrat ($SiO_2 \cdot nH_2O$). Sự thay đổi này làm suy thoái đáng kể tính chất cơ học của keo xi măng.



Các phản ứng này tiếp diễn từ bề mặt bê tông vào sâu bên trong theo thời gian tạo thành một lớp bê tông đã bị cacbonat hóa có độ PH thấp. Khi PH giảm đến khoảng 8,3 thì lớp màng bảo vệ thụ động bị phá hủy [5]. Khi đó, cốt thép sẽ tiếp xúc với oxy và ẩm sẽ bị ăn mòn nhanh. Trong bê tông cacbonat hóa khả năng chống ăn mòn của bê tông bị giảm nhanh vì bị rút kiềm, nứt và áp lực rỉ sắt còn tăng nguy cơ suy giảm kết cấu.

3. CÁC PHƯƠNG PHÁP THỬ NGHIỆM TĂNG TỐC CACBONAT

3.1. Thử nghiệm tăng tốc cacbonat hóa BS EN 12390-12:2020

Mẫu lăng trụ có kích thước (100x100x400)mm.

Thử nghiệm tăng tốc cacbonat hóa là định lượng khả năng kháng cacbonat của cấp phối bê tông bằng cách sử dụng các điều kiện phơi nhiễm được kiểm soát và tăng tốc. Sự thâm nhập CO_2 vào trong bê tông làm suy giảm tính kiềm của bê tông gây hiện tượng ăn mòn và giảm tuổi thọ dự kiến của kết cấu.

Tất cả các mẫu thử cần thiết cho một lần kiểm tra phải được đúc từ một mẻ trộn duy nhất để đảm bảo tính nhất quán của cấp phối.

Quy trình dưỡng hộ và điều kiện phải được tuân thủ nghiêm ngặt:

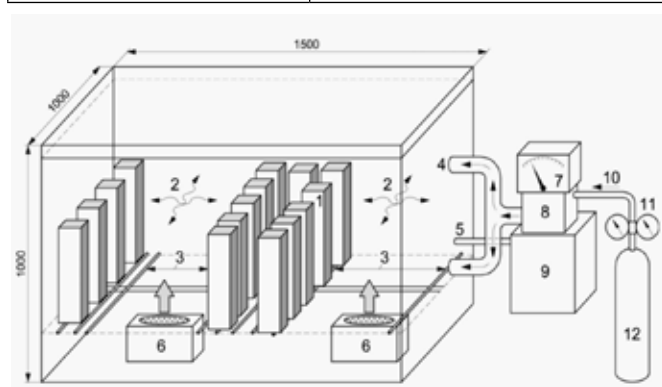
- Dưỡng hộ ban đầu: Mẫu được dỡ khuôn sau 20 ± 4 giờ và được lưu trữ dưới nước cho đến khi 28 ngày tuổi.

- Giai đoạn sấy khô 14 ngày: Sau 28 ngày, mẫu được chuyển sang môi trường không khí phòng thí nghiệm. Giai đoạn điều kiện 14 ngày nhằm giảm độ ẩm của bê tông về mức tối ưu. Nếu mẫu vẫn quá ẩm khi đưa vào buồng tăng tốc có thể vượt quá giới hạn cho phép, làm chậm quá trình cacbonat và dẫn đến kết quả không chính xác.

- Vị trí mẫu: Khi đặt mẫu vào buồng cacbonat, chúng phải được định vị sao cho không khí được phép lưu thông tự do xung quanh các mặt đo, đảm bảo khoảng trống tối thiểu 50 mm giữa các mẫu với tường buồng.

Bảng 1. Thông số thử nghiệm tăng tốc cacbonat theo Tiêu chuẩn BS EN 12390-12:2020

Thông số	Giá trị yêu cầu
Nồng độ CO_2	$(3,0 \pm 0,5)\%$ Theo thể tích
Nhiệt độ T	$(20 \pm 2)^\circ C$
Độ ẩm tương đối RH	$(57 \pm 3)\%$



- | | | |
|------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 - Mẫu bê tông | 5 - Đầu vào hơi nước | 9 - Máy hút ẩm |
| 2 - Dòng chảy hỗn loạn | 6 - Cái quạt | 10 - Khí đầu vào |
| 3 - Nền tảng | 7 - Bộ điều khiển | 11 - Bộ điều chỉnh |
| 4 - Đầu vào CO_2 | 8 - Hộp điều khiển | 12 - Bình khí CO_2 |

Hình 1. Buồng tăng tốc cacbonat hóa [3]

Công thức tính độ sâu cacbonat hóa:

$$d_k = a + K_{AC} \sqrt{t} \quad (4)$$

Tốc độ cacbonat K_{AC} tính theo đơn vị (mm / \sqrt{days})

Thời gian là tổng thời gian tính bằng ngày mẫu bê tông được liên tục phơi nhiễm với CO_2 ; a là giá trị chặn tính bằng mm.

Trường hợp tiêu chuẩn: Đối với hầu hết các loại bê tông giá trị chặn a (độ sâu cacbonat hóa tại thời điểm $t = 0$) được giả định bằng 0.

Trường hợp đo lường ban đầu: Nếu phép đo độ sâu cacbonat hóa được thực hiện tại thời điểm $t = 0$ (áp dụng cho bê tông đồng cứng chậm), tham số a không được đặt bằng 0 mà phải bằng giá trị d_k trung bình đo được tại thời điểm đó.

3.2. Thử nghiệm tăng tốc cacbonat hóa TCVN 13929-2024

Mẫu thử bê tông có hình lăng trụ kích thước (100x100x400)mm.

Tùy thuộc vào mục đích thử nghiệm, có thể sử dụng mẫu thử có hình dạng kích thước khác nhau.

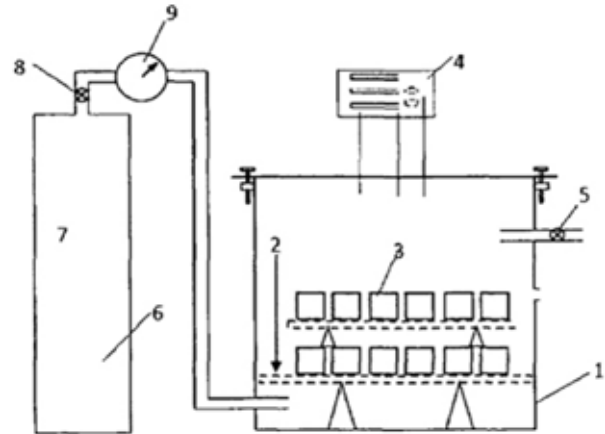
Sử dụng 3 viên mẫu bê tông cho cùng một điều kiện thử nghiệm.

Sau khi tháo khuôn, bảo dưỡng mẫu ở điều kiện ẩm tại nhiệt độ $(27 \pm 2)^\circ C$ cho tới 28 ngày tuổi. Để giữ ẩm có thể ngâm vào nước hoặc bảo dưỡng trong môi trường ẩm.

Đặt mẫu trong phòng nhiệt độ $(27 \pm 2)^\circ C$ và độ ẩm $(60 \pm 5)\%$ cho đến khi đủ 8 tuần tuổi. Từ tuần thứ 7 đến tuần thứ 8 tiến hành phủ kín mặt đáy và hai mặt bên (mặt có kích thước 100x100 mm) và bịt các lỗ rò trên bề mặt mẫu để ngăn CO_2 thâm nhập.

Bảng 2. Thông số thử nghiệm tăng tốc cacbonat hóa theo TCVN 13929-2024

Thông số	Giá trị yêu cầu
Nồng độ CO_2	$(5 \pm 0,2)\%$
Nhiệt độ T	$(27 \pm 2)^\circ C$
Độ ẩm tương đối RH	$(60 \pm 5)\%$



Hình 2. Buồng tăng tốc cacbonat hóa [1]

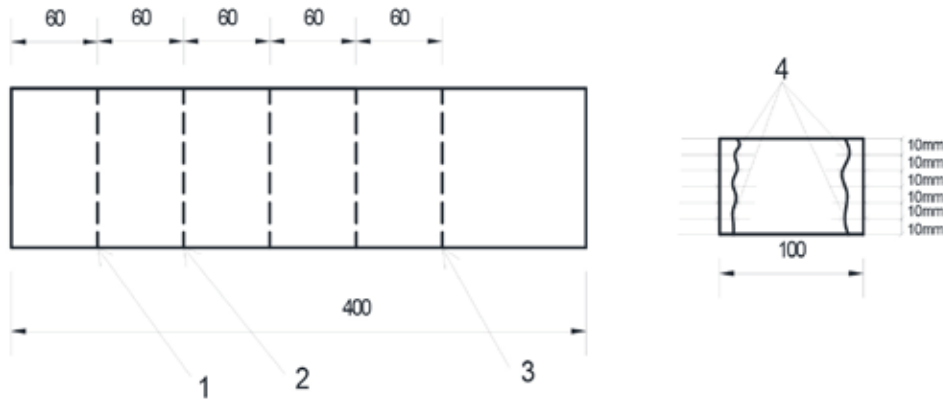
- 1 - Thân tủ cacbonat
- 2 - Giá thép
- 3 - Mẫu bê tông
- 4 - Thiết bị đo và điều chỉnh nồng độ, nhiệt độ, độ ẩm
- 5 - Van.
- 6 - Bình chứa CO_2
- 7 - Khí CO_2 hóa lỏng
- 8 - Van điều áp
- 9 - Đồng hồ đo áp suất khí CO_2

So với tiêu chuẩn châu Âu thì nồng độ CO₂, điều kiện độ ẩm và nhiệt độ đều thay đổi. Nên khi tính toán sức kháng cacbonat theo Fib 2006 [7] ta phải quy đổi về nhiệt độ là 20°C.

Khi mẫu bê tông được bảo dưỡng trong tủ tăng tốc cacbonat hóa đến thời gian quy định, lấy 3 viên mẫu ra khỏi tủ và tiến hành bửa hoặc cắt lát thành mẫu với chiều dày 60 mm, sao cho mặt cắt của mẫu thử vuông góc với phương chiều dài của mẫu thử như trong hình.

Chuẩn bị bề mặt đo và đo chiều sâu cacbonat theo phương pháp thử trong Tiêu chuẩn TCVN 13933:2024 [2].

Các điểm đo phải chia thành 6 phần bằng nhau trên mỗi cạnh của hai mặt không phủ sơn. Các phép đo được thực hiện tại 1; 4; 8; 13; 26 tuần sau khi thử nghiệm tăng tốc cacbonat. Tùy thuộc vào mục đích thử nghiệm có thể bảo dưỡng tăng tốc cacbonat ở các giai đoạn khác nhau.



Hình 3. Vị trí đo chiều sâu cacbonat hóa [2]

Chú ý: Kích thước đo bằng milimet.

4. ĐÁNH GIÁ SO SÁNH CÁC PHƯƠNG PHÁP

Để đánh giá sức kháng cacbonat hóa của kết cấu bê tông, tất cả các phương pháp trên đều cho kết quả khá tốt.

Bảng 3. Bảng so sánh các thông số kỹ thuật tiêu chuẩn tăng tốc cacbonat hóa

Đặc tính kỹ thuật	BS EN 12390-12	XP P18-458	JIS 1153	GB/T 50082	TCVN 13929
Mục đích chính	Kiểm tra sức kháng cacbonat của bê tông	Kiểm tra sức kháng cacbonat của bê tông	Kiểm tra sức kháng cacbonat của bê tông	Kiểm tra sức kháng cacbonat của bê tông	Kiểm tra sức kháng cacbonat của bê tông
Nồng độ CO ₂	(3,0 ± 0,5)%	(3,0 ± 0,5)%	(5,0 ± 0,2)%	(20 ± 3)%	(5,0 ± 0,2)%
Nhiệt độ	(20 ± 2) ^o C	(20 ± 2) ^o C	(20 ± 2) ^o C	(20 ± 2) ^o	(27±2) ^o C
Độ ẩm	(57 ± 3)%	(57 ± 3)%	(60 ± 5)%	(70 ± 5)%	(60±5)%
Thời gian tiền xử lý	28 ngày ngâm nước + 14 ngày không khí	28 ngày ngâm nước + 14 ngày không khí	28 ngày ngâm nước + 28 ngày không khí	28 ngày ngâm nước + sấy 48H ở 60°C	28 ngày ngâm nước + 4 tuần nhiệt độ thường
Chất chỉ thị PH	Phenolphthalein	Phenolphthalein	Phenolphthalein	Phenolphthalein	Phenolphthalein

Quá trình cacbonat hóa bê tông là một hiện tượng phức tạp, đa cơ chế, nhưng chi phối là cơ chế khuếch tán.

Các tiêu chuẩn tăng tốc đều sử dụng nhiệt độ 20°C nhưng riêng TCVN 13929-2024 sử dụng nhiệt độ 27°C.

Các tiêu chuẩn tăng tốc đều sử dụng nồng độ CO₂ cao hơn so với thực tế để tăng tốc cacbonat hóa.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong Đề tài mã số T2026-CT-027.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Viện Vật liệu xây dựng (2024), Bê tông - Phương pháp thử tăng tốc cacbonat hóa, chủ biên.
- [2]. Viện Vật liệu xây dựng (2024), TCVN 13933:2024: Bê tông - Phương pháp đo chiều sâu cacbonat hóa, chủ biên.
- [3]. BS EN 12390 -12:2020 (2020), Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method.
- [4]. JIS A 1153 -2012 (2012), Method of accelerated carbonation test for concrete.
- [5]. V. G. papadakis (1989), A Reaction Problem of Engineering Approach to the

Concrete Carbonation, AIChE vol.35, no.10, review of the standardised testing methods to determine carbonation resistance of concrete, p.173.

[6]. Susan A Bernal and al. (2024), Report of RILEM TC 281-CCC: A critical.

[7]. CFFM %J Bulletin Code (2006), Model code for service life design, Lausanne: Federation Internationale du Beton, fib (34).

[8]. JIS A 1153-2012 (2012), Method of accelerated carbonation test for concrete.